


# Universidad Nacional Agraria La Molina

# Estudio de la radiación solar y balance de radiación

Fernando Jonathan Pastor Dale
Ingeniero Meteorólogo




# Objetivos

1. Conocer la distribución latitudinal - temporal de la radiación solar indicente en el tipe de la atmósfera (Qs).
2. Analizar la distribución temporal de la radiación solar directa y difusa incicente para alguna estaciones del Perú.
3. Encontrar relaciones entre la radiación globa (directa y difusa) con las horas de sol (M) en estaciones de la costa, sierra y selva.
4. Calcular el balance de radiación para la superficie terrestre.



# Generalidades - Radiación solar en el tope de la atmósfera (Qs)

$$Q_s = \frac{1440}{\pi} S \left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2 \cos\phi \cos\delta \,(senH - H^* \cos H) \qquad \frac{ly}{día}$$

$$Q_s = \frac{1440}{\pi} S \left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2 (H^* \, sen\phi \, sen\,\delta + \cos\phi \cos\delta \, senH) \qquad \frac{ly}{día}$$

Donde:

***S*** : Constante solar : $2 \frac{ly}{\min} = 1395 \frac{W}{m^2}$

$\phi$ : Latitud (º)

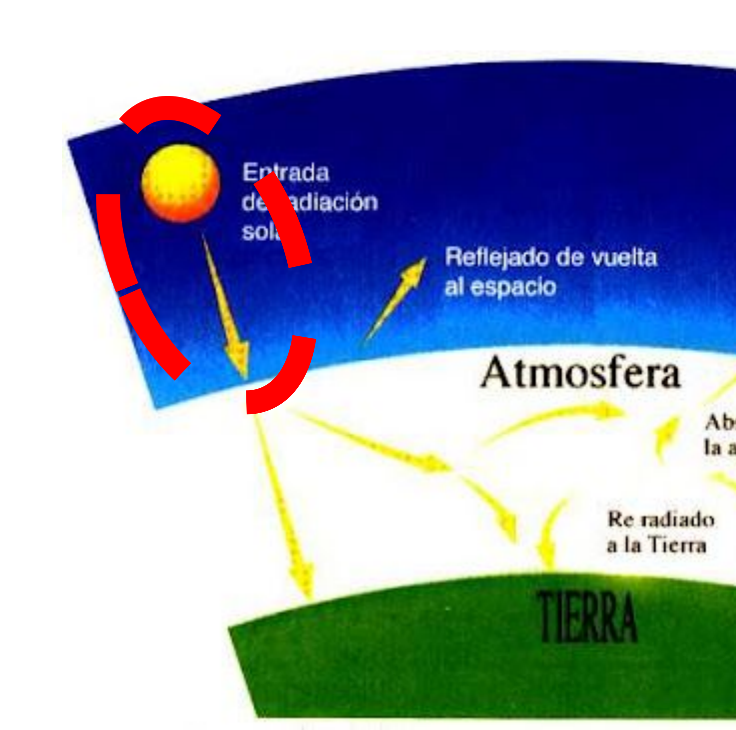
$\delta$ : Declinación solar (º)

***H**** : Angulo horario de salida del sol (radianes)

***H*** : Angulo horario de salida del sol (º)

$H = arc\,Cos(-\,tg\phi \; tg\delta)$

$\left(\frac{\bar{d}}{d}\right)^2$ : Relación entre la distancia media e instantánea entre Sol - Tierra






# Generalidades - Radiación solar en la superficie terrestre (Q + q)

Pasa por procesos de absorción, reflexión y transmisión.

Entrada de radiación solar

Reflejado de vuelta al espacio

Re radiado hacia el espacio

Absobido por la atmósfera

Calor radiado de vuelta por la superficie

Re radiado a Tierra

TIERRA

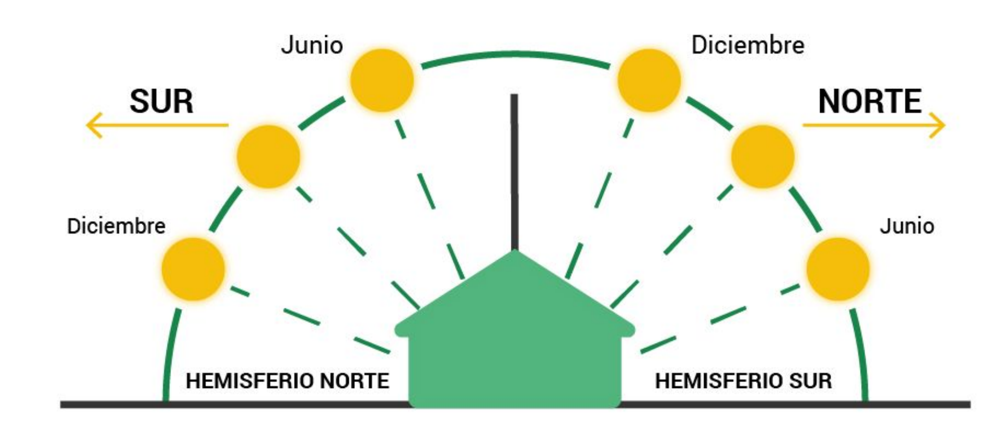


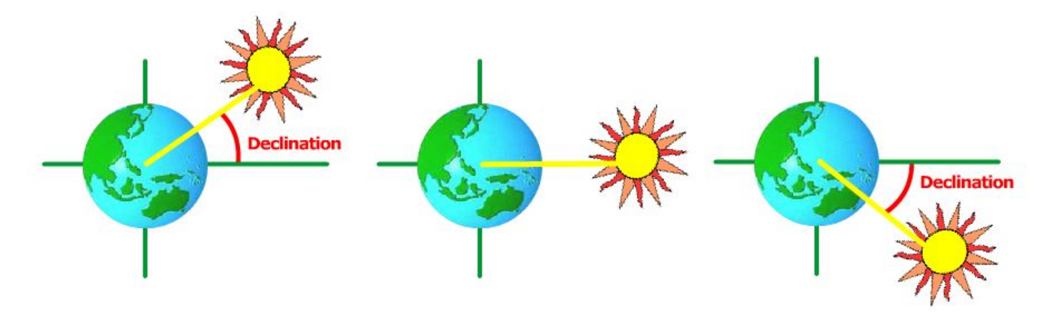

# Generalidades - Horas de sol (M)




# Generalidades - Fotoperiodo (N)

Duración de horas de sol máxima. En cada latitud es diferente. Está en función de la latitud y de la declinación solar.






# Generalidades - Balance de radiación o Radiación neta (Rn)

ESPACIO

ENERGÍA RADIATIVA
(Longitud de onda corta)

SOL

ENERGÍA CALORÍFICA
(Longitud de onda larga)

Radiación solar reflejada
107 $Wm^2$

Radiación solar incidente
342 $Wm^2$

Radiación de onda larga emitida al espacio
235 $Wm^2$

40
Ventana atmosférica de infrarrojos

Emisión de radiación infrarroja desde la atmósfera
195

Radiación solar absorbida por la atmósfera
67

77
Radiación solar reflejada por nubes, aerosoles y atmósfera

GASES INVERNADERO

Calor latente
78

350
Radiación absorbida por GEI

324
Radiación de la Atmósfera

30
Radiación solar reflejada por la superficie

24
Térmicas
Calor sensible

78
Evapotranspiración

390
Infrarrojos emitidos desde la superficie

168
Radiación solar absorbida por la superficie

TIERRA

324
Infrarrojos absorbidos




# Ecuaciones empíricas de la radiación solar incidente

$$(Q+q)_i = Q_S\left(a + b\frac{M}{N}\right)$$

$$R_{noc} = (Q+q)_i\,(1-\alpha)$$

Donde:

$(Q+q)_i$: radiación solar incidente

$\alpha$ : Albedo

$Q_S$ : Radiación en el tope de la atmósfera

M : Horas de sol

N : Fotoperiodo

$R_{noc}$ : Radiación neta en onda corta




# Práctica de análisis de radiación




# Ejercicio a)

**a) Estudio de la radiación solar en el tope de la atmósfera ($Q_S$)**

- Haciendo uso de la tabla 5.1, realizar un gráfico de $Q_S$ (eje Y) versus el tiempo en meses (eje X), para las siguientes latitudes: 0º, 12º S, 20º S, 30º S, 50º S y 70º S
- Analice y explique las causas del comportamiento de $Q_S$ a estas latitudes

**Tabla 5.1:** Valores de Radiación solar en el tope de la atmósfera ($Q_S$), expresado como mm de agua evaporable - hemisferio sur

| Lat (S) | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 14,57 | 15,03 | 15,30 | 14,97 | 14,21 | 13,62 | 13,71 | 14,44 | 15,07 | 15,13 | 14,70 | 14,37 |
| 2 | 14,88 | 15,22 | 15,33 | 14,83 | 13,95 | 13,29 | 13,40 | 14,23 | 15,01 | 15,23 | 14,95 | 14,69 |
| 4 | 15,17 | 15,40 | 15,35 | 14,68 | 13,66 | 12,95 | 13,08 | 13,99 | 14,92 | 15,32 | 15,19 | 15,01 |
| 6 | 15,44 | 15,57 | 15,35 | 14,50 | 13,36 | 12,60 | 12,75 | 13,74 | 14,82 | 15,39 | 15,40 | 15,30 |
| 8 | 15,70 | 15,71 | 15,32 | 14,31 | 13,05 | 12,24 | 12,40 | 13,48 | 14,70 | 15,45 | 15,61 | 15,59 |
| 10 | 15,95 | 15,84 | 15,28 | 14,10 | 12,73 | 11,86 | 12,04 | 13,20 | 14,56 | 15,48 | 15,79 | 15,85 |
| 12 | 16,17 | 15,94 | 15,22 | 13,88 | 12,39 | 11,47 | 11,66 | 12,90 | 14,41 | 15,50 | 15,96 | 16,10 |
| 14 | 16,38 | 16,03 | 15,14 | 13,64 | 12,03 | 11,07 | 11,28 | 12,59 | 14,23 | 15,49 | 16,11 | 16,34 |
| 16 | 16,57 | 16,11 | 15,05 | 13,38 | 11,67 | 10,67 | 10,89 | 12,27 | 14,04 | 15,47 | 16,24 | 16,56 |
| 18 | 16,75 | 16,16 | 14,93 | 13,11 | 11,29 | 10,25 | 10,48 | 11,93 | 13,84 | 15,43 | 16,35 | 16,76 |
| 20 | 16,91 | 16,20 | 14,80 | 12,82 | 10,90 | 9,82 | 10,07 | 11,58 | 13,61 | 15,38 | 16,45 | 16,94 |
| 22 | 17,05 | 16,21 | 14,65 | 12,52 | 10,50 | 9,38 | 9,64 | 11,22 | 13,37 | 15,30 | 16,53 | 17,11 |
| 24 | 17,18 | 16,21 | 14,48 | 12,20 | 10,09 | 8,94 | 9,21 | 10,84 | 13,12 | 15,21 | 16,59 | 17,26 |
| 26 | 17,28 | 16,19 | 14,29 | 11,87 | 9,67 | 8,49 | 8,77 | 10,46 | 12,84 | 15,09 | 16,63 | 17,39 |
| 28 | 17,37 | 16,15 | 14,09 | 11,52 | 9,24 | 8,04 | 8,33 | 10,06 | 12,56 | 14,96 | 16,66 | 17,51 |
| 30 | 17,45 | 16,10 | 13,87 | 11,17 | 8,81 | 7,57 | 7,87 | 9,65 | 12,25 | 14,81 | 16,67 | 17,61 |
| 32 | 17,50 | 16,02 | 13,63 | 10,79 | 8,36 | 7,11 | 7,42 | 9,24 | 11,93 | 14,65 | 16,66 | 17,70 |
| 34 | 17,54 | 15,93 | 13,38 | 10,41 | 7,91 | 6,64 | 6,95 | 8,81 | 11,60 | 14,47 | 16,63 | 17,77 |
| 36 | 17,56 | 15,82 | 13,11 | 10,01 | 7,45 | 6,17 | 6,49 | 8,37 | 11,26 | 14,27 | 16,59 | 17,82 |
| 38 | 17,57 | 15,70 | 12,82 | 9,61 | 6,99 | 5,70 | 6,02 | 7,93 | 10,90 | 14,05 | 16,53 | 17,86 |
| 40 | 17,56 | 15,56 | 12,52 | 9,19 | 6,52 | 5,22 | 5,55 | 7,48 | 10,52 | 13,82 | 16,45 | 17,88 |
| 42 | 17,54 | 15,40 | 12,20 | 8,76 | 6,05 | 4,75 | 5,08 | 7,02 | 10,14 | 13,57 | 16,36 | 17,89 |
| 44 | 17,50 | 15,22 | 11,87 | 8,32 | 5,58 | 4,28 | 4,61 | 6,56 | 9,74 | 13,30 | 16,25 | 17,88 |
| 46 | 17,45 | 15,03 | 11,53 | 7,87 | 5,10 | 3,81 | 4,14 | 6,09 | 9,33 | 13,02 | 16,13 | 17,86 |
| 48 | 17,39 | 14,83 | 11,17 | 7,42 | 4,63 | 3,35 | 3,68 | 5,62 | 8,91 | 12,73 | 16,00 | 17,83 |
| 50 | 17,31 | 14,61 | 10,79 | 6,96 | 4,15 | 2,90 | 3,22 | 5,15 | 8,48 | 12,42 | 15,85 | 17,79 |
| 52 | 17,23 | 14,38 | 10,41 | 6,49 | 3,68 | 2,46 | 2,77 | 4,68 | 8,04 | 12,10 | 15,69 | 17,75 |
| 54 | 17,14 | 14,13 | 10,01 | 6,01 | 3,22 | 2,03 | 2,33 | 4,20 | 7,59 | 11,76 | 15,52 | 17,70 |
| 56 | 17,04 | 13,87 | 9,60 | 5,53 | 2,76 | 1,61 | 1,90 | 3,73 | 7,13 | 11,42 | 15,34 | 17,64 |
| 58 | 16,94 | 13,61 | 9,17 | 5,05 | 2,31 | 1,22 | 1,49 | 3,26 | 6,66 | 11,06 | 15,15 | 17,59 |
| 60 | 16,85 | 13,34 | 8,74 | 4,56 | 1,87 | 0,85 | 1,11 | 2,80 | 6,19 | 10,68 | 14,96 | 17,54 |
| 62 | 16,77 | 13,06 | 8,30 | 4,07 | 1,45 | 0,52 | 0,75 | 2,34 | 5,70 | 10,30 | 14,77 | 17,52 |
| 64 | 16,70 | 12,77 | 7,85 | 3,58 | 1,05 | 0,24 | 0,43 | 1,89 | 5,22 | 9,91 | 14,59 | 17,52 |
| 66 | 16,67 | 12,49 | 7,38 | 3,09 | 0,69 | 0,04 | 0,16 | 1,46 | 4,72 | 9,52 | 14,42 | 17,58 |
| 68 | 16,72 | 12,21 | 6,91 | 2,61 | 0,36 |  | 0,00 | 1,05 | 4,22 | 9,11 | 14,27 |  |
| 70 |  | 11,95 | 6,44 | 2,13 | 0,11 |  |  | 0,67 | 3,72 | 8,71 | 14,16 |  |




# Ejercicio b) - b.1)

**b.1) Variación horaria de la radiación solar $(Q + q)_i$**

- Con los datos de la tabla 5.2, elabore un meteorograma de $(Q + q)_i$ en el eje Y versus tiempo en horas en el eje X. Represente en el mismo gráfico la variación horaria de la radiación incidente para un día de verano y para un día de invierno.
- Analice los factores que determinan esta variación horaria de la radiación.
- Llenar el Cuadro I

**Tabla 5.2:** Radiación solar $(Q + q)_i$ horaria ($W/m^2$) - Estación La Molina - Año: 2008

| hora | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Enero** | 0.3 | 29.8 | 115.1 | 256.3 | 394.7 | 535.0 | 636.3 | 697.3 | 660.6 | 526.5 | 351.6 | 201.0 | 85.7 | 16.1 |
| **Julio** | 0.0 | 2.5 | 31.6 | 84.9 | 148.2 | 234.4 | 345.9 | 449.2 | 474.5 | 412.2 | 299.3 | 150.3 | 32.5 | 0.0 |

**Cuadro I:** Valores máximos y mínimos de la radiación solar horaria

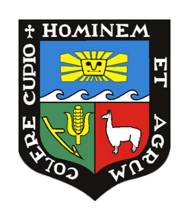
| **Estación:** | | | |
|---|---|---|---|
| Verano | | Invierno | |
| $(Q + q)_{máx}$ = | $(Q + q)_{mín}$ = | $(Q + q)_{máx}$ = | $(Q + q)_{mín}$ = |
| Hora : | Hora : | Hora : | Hora : |




# Ejercicio b) - b.2)

**b.2) Variación mensual de la Radiación solar $(Q + q)_i$**

- Considerando la tabla 5.3, construya un gráfico de $(Q + q)_i$ en el eje Y versus tiempo en meses en el eje X, de tal forma que las 5 localidades estén representados en un mismo gráfico.
- Analice a variación de las mismas teniendo en cuenta la ubicación geográfica de las 5 estaciones.
- Llenar el cuadro II




# Ejercicio b) - b.2)

**Tabla 5.3:** Promedios de Radiación solar $(Q+q)_i$ en Ly/día, para diferentes estaciones del Perú

| Meses | LA CATOLICA | CIP HUANCAYO | HUARAZ | LAMBAYEQUE | YURIMAGUAS |
|---|---|---|---|---|---|
| ENE | 402 | 515 | 518 | 502 | 327 |
| FEB | 412 | 517 | 469 | 520 | 357 |
| MAR | 377 | 499 | 461 | 498 | 355 |
| ABR | 411 | 493 | 469 | 449 | 332 |
| MAY | 348 | 477 | 436 | 414 | 340 |
| JUN | 161 | 455 | 440 | 376 | 320 |
| JUL | 169 | 466 | 432 | 333 | 371 |
| AGO | 222 | 509 | 509 | 374 | 407 |
| SET | 228 | 546 | 504 | 436 | 416 |
| OCT | 335 | 530 | 637 | 495 | 397 |
| NOV | 338 | 536 | 529 | 483 | 408 |
| DIC | 272 | 538 | 522 | 470 | 387 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **La Molina** | 12º05' S | 76º57' W | 243 msnm |
| **CIP Huancayo** | 12º02' S | 75º17' W | 3260 msnm |
| **Huaraz** | 09º31'S | 77º01' W | 3091 msnm |
| **Lambayeque** | 06º42' S | 79º55' W | 18 msnm |
| **Yurimaguas** | 05º45' S | 76º05' W | 179 msnm |

**Cuadro II:** Valores máximos y mínimos de $(Q+q)_i$

| Localidad | Máximas | | Mínimas | |
|---|---|---|---|---|
| | Ly/día | Mes | Ly/día | Mes |
| La Católica | | | | |
| Huayao | | | | |
| Huaraz | | | | |
| Lambayeque | | | | |
| Yurimaguas | | | | |




# Ejercicio b) - b.2)

- Construya otro meteorograma de radiación vs tiempo (meses), pero esta vez considerando la radiación en el tope de la atmósfera ($Q_S$) para 12° S y la radiación incidente para la estación de La Católica. Explicar las posibles causas de esta diferencia. (Considere que 1 mm = 59,7 ly)

# Ejercicio b) - b.3)

**b.3) Variación Diaria de la Radiación Solar**

- Con los datos de la *tabla 5.5*, construya un gráfico de $(Q + q)_i$ vs tiempo (días). En el mismo gráfico también incluya un gráfico de horas de sol vs tiempo (días). Para esto considere un eje secundario a la escala de las horas de sol.
- Analice la relación que existe entre la radiación incidente y la horas de sol
- Determine una ecuación de regresión con la cual se puede estimar la radiación solar incidente $(Q + q)_i$ en función de las horas de sol (M)

$$(Q + q)_i = a + b\,M$$




# Ejercicio b) - b.4)

**b.4) Variación Multianual de la Radiación Solar**

- Con los datos presentados en la tabla *5.4*, construir un gráfico de radiación solar $(Q+q)_i$ vs tiempo (años). Para este caso se pueden tomar la escala de tiempo en años, para lo cual se tomará los datos de un mes específico o también se puede tomar la escala del tiempo en meses – años, que en ese caso los datos de radiación serán tomados todos los existentes en la tabla en mención.
- Explicar la tendencia de estas variaciones en el transcurso de los años.




# Ejercicio c)

**c) Estimación del balance de radiación o radiación neta (Rn)**

El balance de radiación en la superficie terrestre conocida como la radiación neta (Rn) se refiere a la evaluación de entrada y salida de radiación en corta y en onda larga de dicha superficie. Se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Rn = R_{noc} + R_{nol}$$

Donde:

$R_{noc}$ = radiación neta en onda corta

$R_{nol}$ = radiación neta en onda larga

$$R_{noc} = (Q + q)_i \, (1 - \alpha)$$

Donde:

$(Q + q)_i$ = radiación incidente (mm/día o ly/día)

$\alpha$ = albedo de la superficie (en décimos)

$$R_{nol} = I_i - I_t = -\sigma T^4 \left(0{,}56 - 0{,}079\sqrt{e}\right)\left(0{,}1 + 0{,}9\,\frac{M}{N}\right)$$




# Ejercicio c)

**c) Estimación del balance de radiación o radiación neta (Rn)**

El balance de radiación en la superficie terrestre conocida como la radiación neta (Rn) se refiere a la evaluación de entrada y salida de radiación en corta y en onda larga de dicha superficie. Se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Rn = R_{noc} + R_{nol}$$

Donde:

$R_{noc}$ = radiación neta en onda corta

$R_{nol}$ = radiación neta en onda larga

$$R_{noc} = (Q + q)_i\,(1 - \alpha)$$

Donde:

$(Q + q)_i$ = radiación incidente (mm/día o ly/día)

$\alpha$ = albedo de la superficie (en décimos)

$$R_{nol} = I_i - I_t = -\sigma T^4 \left(0{,}56 - 0{,}079\sqrt{e}\right)\left(0{,}1 + 0{,}9\,\frac{M}{N}\right)$$

Donde:

$I_i$ = Contrarradiación

$I_t$ = Radiación termal

$\sigma$ = Constante de Stefan = 1,17 x $10^{-7}$ ly/día.$K^4$ = 1,9615 x $10^{-9}$ mm/día.$K^4$

T = Temperatura del aire (K)

e = Presión de vapor actual (hPa)

M = horas de sol (horas)

N = Fotoperíodo (horas)

$$N = \frac{2\ \arccos(-\tan\phi\ \tan\delta)}{15}$$

Donde:

$\phi$ = latitud del lugar

$\delta$ = declinación solar




# Ejercicio c)

- Haciendo uso la tabal 5.7, determine el fotoperiodo para cada mes.
- Con los resultados del paso anterior y usando los datos de las tabla 5.6, cuantifique el balance de radiación (Rn).
- Llene el cuadro III
- Con los datos obtenido en el cuadro III grafique los términos del balance de radiación (*Rnoc, Rnol y Rn*) vs tiempo (meses)

**Tabla 5.7:** Declinación solar promedio mensual (δ)

| Mes | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DIC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| δ(º) | -21.13 | -13.03 | -2.52 | 9.78 | 19.02 | 23.35 | 21.37 | 13.49 | 1.87 | -9.91 | -19.34 | -23.34 |




# Ejercicio c)

**Tabla 5.6:** Datos meteorológicos para el cálculo del Balance de radiación (RN)

Estación: Huayao

Albedo ($\alpha$) = 20 %

| Meses | $(Q + q)_i$ Ly/día | HS Horas | T(°C) | e(hPa) |
|---|---|---|---|---|
| ENE | 585 | 5.0 | 10.9 | 9.8 |
| FEB | 538 | 4.4 | 10.6 | 9.9 |
| MAR | 576 | 5.1 | 11.0 | 10.1 |
| ABR | 562 | 6.6 | 10.1 | 8.4 |
| MAY | 526 | 7.5 | 10.1 | 7.9 |
| JUN | 476 | 7.9 | 9.2 | 7.2 |
| JUL | 506 | 8.7 | 8.7 | 6.6 |
| AGO | 536 | 7.4 | 10.3 | 7.3 |
| SET | 562 | 6.3 | 11.2 | 7.8 |
| OCT | 691 | 8.2 | 12.5 | 7.8 |
| NOV | 702 | 8.1 | 12.2 | 8.1 |
| DIC | 641 | 6.0 | 11.7 | 9.0 |




# Ejercicio c)

**Cuadro III:** balance de radiación (Rn)

Estación:

| Meses | δ (º) | N (horas) | (Q + q) (ly/día) | M (horas) | T (ºC) | e (hPa) | Rnoc (Ly/día) | Rnol (Ly/día) | Rn (Ly/día) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ENE | -21.13 | | 585 | 5.0 | 10.9 | 9.8 | | | |
| FEB | -13.03 | | 538 | 4.4 | 10.6 | 9.9 | | | |
| MAR | -2.52 | | 576 | 5.1 | 11.0 | 10.1 | | | |
| ABR | 9.78 | | 562 | 6.6 | 10.1 | 8.4 | | | |
| MAY | 19.02 | | 526 | 7.5 | 10.1 | 7.9 | | | |
| JUN | 23.35 | | 476 | 7.9 | 9.2 | 7.2 | | | |
| JUL | 21.37 | | 506 | 8.7 | 8.7 | 6.6 | | | |
| AGO | 13.49 | | 536 | 7.4 | 10.3 | 7.3 | | | |
| SET | 1.87 | | 562 | 6.3 | 11.2 | 7.8 | | | |
| OCT | -9.91 | | 691 | 8.2 | 12.5 | 7.8 | | | |
| NOV | -19.34 | | 702 | 8.1 | 12.2 | 8.1 | | | |
| DIC | -23.34 | | 641 | 6.0 | 11.7 | 9.0 | | | |




# Universidad Nacional Agraria La Molina


## Departamento de Física y Meteorología

**Ingeniero Meteorólogo**
**Fernando Pastor**

**Contacto:**
fpastor@lamolina.edu.pe